DOI: 10.22067/jfcei.2022.75533.1125 *https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/*

بررسی اثر میلگرد و خاموت‌های ساخته‌شده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف شیشه‌ای بر رفتار تیرهای بتن‌آرمه*

مقاله پژوهشی

محمد میرزایی فتح کوهی[۱] فرزاد حاتمی برق[۲] حمیدرضا ربیعی‌فر[۳]

چکیده *تیر از مهم‌ترین اعضای سازه‌های بتن‌آرمه است که به دلایل مختلفی، نیاز به استفاده از مواد و مصالح جدید دارد. یکی از راهکارهای افزایش مقاومت باربری تیرهای بتن‌آرمه، جایگزینی مصالح مصرفی با مواد جدید می‌باشد. میلگردهای پلیمری مسلح‌شده با الیاف (FRP) یکی از مصالح ساختمانی جدید می‌باشد که با وزنی کمتر و مقاومتی بیشتر نسبت‌به میلگردهای معمولی، می‌توانند علاوه‌بر کاهش هزینه‌های اجرایی بتن، سبب بهبود عملکرد آن‌ها درمقابل ترک‌های برشی گردد. در این مطالعه از میلگردهای FRP با الیاف شیشه (GFRP) برای ساخت تیرهای بتنی با ابعاد مقطع ۲۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر استفاده شد. برای انجام آزمایش نیز از روش آزمایش بارگذاری چهارنقطه‌ای در آزمایشگاه استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از خاموت‌های GFRP باعث افزایش مقاومت برشی تا سه برابر و کاهش شکل‌پذیری تیرهای بتنی تا ۵۵ درصد می‌شود.*

واژه‌های کلیدی بتن، میلگرد، خاموت، تیرهای بتن‌آرمه، پلیمر مسلح‌شده با الیاف شیشه‌ای (GFRP).

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل مورد بحث در جامعهٔ مهندسی، نوآوری سازه‌های بتن مسلح می‌باشد [1]. با گسترش تکنولوژی و ظهور فناوری‌های جدید در صنعت عمران، استفاده از نوآوری‌های جدید در سازه‌های بتن مسلح امری اجتناب‌ناپذیر است [2,3]. تیر از مهم‌ترین اعضای سازه‌های بتن‌آرمه است که به‌دلایل مختلفی از قبیل ایجاد ترک، خوردگی بتن و آرماتورهای ناحیهٔ کششی تیر، خیز زیاد و عدم اجرای اصولی سازه در زمان ساخت، تغییر کاربری سازه و عدم تطابق با قوانین و آیین‌نامه‌های جدید، نیاز به استفاده از مواد و مصالح جدید دارد تا بتوان با هزینه‌ای کمتر طول عمر مفید سازه و هرگونه زیرساخت را افزایش داد و زمینهٔ بهره‌برداری را برای آن‌ها استمرار بخشید [4,5]. در گذشته برای جبران نقاط ضعف موارد ذکرشده، از روش‌هایی هم‌چون زره‌پوش بتنی و فولادی استفاده می‌شد.

با گسترش روز افزون تکنولوژی و نیاز به استفاده از مصالح جدید امروزه مواد FRP جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساختمان پیدا کرده‌است. استفادهٔ درست و اصولی از این مواد، مستلزم شناخت مسایل مرتبط با آن‌هاست. میلگردها و ورقه‌های FRP به‌مرور جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساختمان پیدا کرده‌است. میلگردهای FRP به‌دلیل وزن سبک‌تر تا یک‌سوم میلگردهای فولادی مشابه و مقاومت ۱۰ برابری نسبت‌به آن‌ها به‌مرور جای میلگردهای فولادی را خواهد گرفت ضمن آن‌که از نظر اقتصادی کم‌هزینه‌تر نیز هستند. این میلگردها به‌خاطر خصوصیات مواد به‌کار رفته در آن مقاومت بهتری نسبت‌به خوردگی دارد و شاید بتوان تنها ضعف این میلگردها را نسبت‌به میلگردهای فولادی پیوستگی کمتر آن‌ها به بتن دانست.

مطالعات متعددی دربارهٔ بررسی اثر پیوستگی میلگردها و ورقه‌های FRP در سازه‌های بتنی به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی توسط محققان داخلی و خارجی ارائه شده‌است که از آن جمله می‌توان به مطالعهٔ سعد فرید و جبار [6] در سال ۲۰۰۲ با مقاله‌ای تحت عنوان جای‌گذاری میلگردهای GFRP با میلگردهای فولادی در سازه‌های بتنی اشاره نمود زی‌وانگ‌سان، و همکاران [7] مقاله‌ای با عنوان مطالعهٔ آزمایشگاهی برروی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای بسته‌های FRP فولادی و قادر احمد، دیلشاد کاکاسور و عبدالخالق یاسین مقاله‌ای تحت عنوان مقاومت و شکست خمشی تیرهای بتن الیافی مسلح‌شده با میلگردهای CFRP اشاره نمود. در تمامی آن‌ها از میلگردهای FRP به‌جای میلگردهای فولادی استفاده شده است؛

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱/۷می‌باشد.

(۱) گروه مهندسی عمران، واحد بین المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
(۲) نویسنده مسئول، استادیار، مرکز تحقیقات سازه و زلزله، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. **Email:** hatami@aut.ac.ir
(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

درحالی‌که هم‌چنان خاموت‌ها از نوع فولادی می‌باشند. از آن‌جا که خاموت‌ها، عوامل مؤثر دربرابر ترک‌های برشی تیرها هستند، استفاده از این اعضا اثر قابل توجهی بر کاهش ترک‌خوردگی تیر و کاهش خیز و احتمالاً افزایش چسبندگی خواهد داشت، در این تحقیق سعی خواهد شد تا رفتار یک تیر بتنی که بااستفاده از میلگردها و خاموت‌های کامپوزیت پلیمری- الیاف شیشه‌ای (GFRP) ساخته شده، مورد بررسی قرار گیرد.

درواقع هدف از مطالعهٔ حاضر بررسی اثر میلگردها و خاموت‌های GFRP بر رفتار و طول عمر مفید تیرهای بتنی است تا درصورت اثبات توانایی این نوع میلگردها و خاموت‌ها در برآورده کردن انتظارات خمشی و برشی، برای افزایش طول عمر مفید تیرهای بتنی در محیط‌های خورنده، بتوان آن‌ها را جایگزین میلگردها و خاموت‌های فولادی نمود.

مطالعات پیشین

سعد فرید در سال ۲۰۰۲ چهار نمونه شامل بتن غیرمسلح، بتن مسلح‌شده با الیاف GFRP با سطح صاف، بتن مسلح‌شده با الیاف GFRP پوشش داده‌شده با ماسه و بتن مسلح‌شده با میلگردهای فولادی را مورد آزمایش قرار داد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که مقاومت کششی میلگردهای GFRP، ۵۹۳ و مقاومت چسبندگی ۷۶۰ مگاپاسکال است و مقاومت فشاری در حد معقول بتن در حدود ۲۵/۶۷ مگاپاسکال است [6].

زی‌وانگ‌سان و همکاران ۵ تیر بتنی مسلح‌شده با بسته‌های هیبریدی را مورد آزمایش قرار دادند. نمونه‌ها توسط میلگردهای فولادی و میلگردهای بسته‌ای FRP فولادی مسلح شده بود. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که همهٔ تیرها مدهای شکست خردشدگی بتن را پس از تسلیم میلگردهای فولادی نشان می‌دهند که توسعهٔ پلاستیک میلگردهای فولادی توسط میلگردهای FRP مهار شده‌است [7].

رامی حمد و همکاران [8] نقش استفاده از کلاهک‌های انتهایی فولادی برای افزایش رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح‌شده با FRP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از تکنیک پیشنهادی به‌طور محسوسی مقاومت اتصال بین میلگردهای FRP و بتن آسیب‌دیده از گرما را بهبود بخشیده‌است و پاسخ خمشی تیرهای متناظر را ارتقا داده‌است.

قادر احمد و همکاران[9] رفتار و مقاومت خمشی تیرهای با بتن معمولی و بتن الیافی را که هر دو با میلگردهای CFRP مسلح شده بودند مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش خیز و افزایش اولین‌بار ترک‌خوردگی با افزایش مقاومت فشاری، افزایش اندکی در خیز تیر بتن الیافی و نزدیک به همان مقدار بار نهایی مشاهده شد.

دجیان شن و همکاران[10] رفتار پیوستگی اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای BFRP را تحت نرخ‌های مختلف کرنش مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها و آنالیزهای مربوط نشان داد که مقاومت اتصال اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای BFRP با افزایش نرخ‌های کرنش افزایش پیدا کرد و یک مدل برای مقاومت چسبندگی باتوجه به نرخ کرنش پیشنهاد شد.

فیاض جواد و همکاران[11] رفتار سازه‌ای تیرها و ستون-های بتنی مسلح‌شده با میلگردهای ساخته‌شده از ترکیب پلاستیک‌های زائد WPGFRP را مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پلاستیک زاید در میلگردهای GFRP که منجر به تولید میلگردهای WPGFRP می‌شود مقاومت کششی و فشاری میلگردها را به‌ترتیب ۱۷/۲٪ و ۱۹/۳٪ افزایش می‌دهد و از این‌رو مقاومت مواد اضافه‌شده اثبات شد.

ژیکیا نگ دانگ و همکاران[12] رفتار تیرهای هیبریدی ترکیب‌شده از بتن آب شور دریا و پوسته‌های پیش‌ساختهٔ مسلح شده با میلگردهای FRP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت خمشی تیرهای مورد آزمایش بهبود قابل توجهی نیافت اما بار ترک‌خوردگی و جذب انرژی به‌ترتیب حدود ۷۰ درصد و ۲۴ درصد بهبود یافت.

بهروز قاضی و علی یوسف[13] شش تیر بتنی با مقاومت بالا در مقیاس بزرگ که با میلگردها و خاموت‌های BFRP مسلح شده بود و سه تیر متناظر بدون خاموت ساختند و آن‌ها را برای شکست برشی تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار دادند. نتایج آزمایش نشان داد که اثر اندازه در شکست برشی نمی‌تواند به‌طور کامل حذف شود، چراکه ترک برشی اولیه، عرض ترک برشی، تحلیل اجزای مقاوم دربرابر برش، کرنش خاموت‌های BFRP و مقاومت برشی عادی شده هنوز به عمق تیر مرتبط هستند.

توماس آنتونیو و مارکو[14] پیزانی رفتار بلندمدت میلگردهای مسلح GFRP را مورد بررسی قرار دادند. میلگردهای

تقویت‌شده با الیاف شیشه نشان‌دهندهٔ یک راه حل معتبر به‌عنوان تقویت داخلی اعضای بتنی برای برخی از کاربردهای خاص است. میلگردهای GFRP نسبت‌به وزنشان مقاومت بالا و هم‌چنین مقاومت خوبی دربرابر خوردگی دارند.

حمید صدرایی و همکاران[15] تأثیر مواد به‌کاررفته در میلگردها، مقدار و نحوهٔ آرایش آن‌ها و مقاومت بتن و ضخامت دال را برروی رفتار دینامیکی دال‌های بتنی مسلح به روش‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که افزایش نسبت تقویت یا ضخامت دال رفتار دال‌های بتنی مسلح را تحت بارهای ضربه‌ای افزایش می‌دهند.

عثمان حامد و همکاران[16] نتایج ۹ تیر بتنی عمیق پیوستهٔ دو دهنهٔ مسلح‌شده با میلگردهای GFRP و یک نمونهٔ مسلح‌شده با میلگردهای فولادی را منتشر کردند. دو نسبت ۱ و ۱/۷ درصد و سه ارتفاع مقطع ۳۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و هم‌چنین دو نسبت آرماتورگذاری شبکهٔ ۰ و ۰/٤درصد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نسبت آرماتورگذاری شبکهٔ ظرفیت باربری را تا حدود ۱۰ و ۱۸ درصد به‌ترتیب برای نمونه‌ها با نسبت ۱ و ۱/۷ بهبود بخشیده‌است.

ناجیه صالح و همکاران[17] خواص پیوستگی بین میلگردهای GFRP کار گذاشته‌شده در بتن با مقاومت بالا را به‌صورت آزمایشگاهی از طریق تست کشش مورد بررسی قرار دادند. بررسی چشمی نمونه‌های آزمایش‌شدهٔ مسلح‌شده با میلگردهای GFRP نشان داد که گسیختگی ناشی از کشش به‌علت آسیب سطح بیرونی میلگردها بوده‌است درحالی‌که قسمت پوشیده‌شده با ماسه نتایج قابل قبولی در پیوستگی نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف GFRP از خود نشان داد.

چنگ و همکاران[18] به بررسی مقاومت برشی و رفتار شکست دال‌های بتنی مسلح تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ورقه‌های GFRP به‌طور قابل توجهی ظرفیت برشی پانچ اتصالات دال- ستون را افزایش می‌دهد.

ژو و همکاران[19] رفتار میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه با پوشش شن و ماسه را به‌طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعهٔ آن‌ها نشان داد که استحکام میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه‌ای با پوشش شن و ماسه به‌طور متوسط ۵۹ تا ۱۲۷ درصد نسبت‌به میلگردهای فولادی تغییر شکل یافته بیشتر است و زمانی‌که قطر میلگرد افزایش یابد، استحکام میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشهٔ تغییر شکل داده‌شده با پوشش ماسه کاهش می‌یابد.

لیو و همکاران[20] میلگردهای کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه را که تحت تکنولوژی جدید به پیچاندن سعی بر افزایش مقاومت آن‌ها داشتند، مورد بررسی قرار دادند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری برروی میلگردهای GFRP با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر با قطر هستهٔ ۲۰ میلی‌متر برای تعیین بهبود مقاومت فشاری، شکل‌پذیری و رفتار شکست انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میلگردهای GFRP با قطر هستهٔ ۲۰ میلی‌متر، نتایج امیدوارکننده‌ای را در مقاومت فشاری و شکل‌پذیری با افزایش تعداد لایه‌های پیچ داده‌شده نشان داده‌اند که در آن مقاومت فشاری میلگردهای با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر به‌ترتیب ۷٤ و ٦۳ درصد افزایش یافته‌است.

روش‌شناسی

در این تحقیق سعی خواهد شد تا با ساخت چندین تیر بتنی که متغیر اصلی در آن‌ها میلگردها و خاموت‌ها هستند، به بررسی و مقایسه میان میلگردها و خاموت‌های فولادی با میلگردها و خاموت‌های GFRP دست یافت. از همین رو مطابق شکل (۱) برای نیل به این هدف سه تیر بتنی با ابعاد مقطع ۲۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر ساخته خواهد شد. متغیر اصلی در این تیرها میلگردها و خاموت‌ها هستند به‌نحوی که تیر اول توسط آرماتورها و خاموت‌های فولادی، تیر دوم توسط آرماتورهای GFRP و خاموت‌های فولادی و تیر سوم توسط آرماتورها و خاموت‌های GFRP مسلح خواهند شد. مقاومت بتن در هر سه تیر ثابت فرض می‌شود. سپس این تیرها در آزمایشگاه تحت بار چهار نقطه‌ای قرار خواهند گرفت و از روی منحنی P-delta و نتایج حاصل از اطلاعات کرنش‌سنج‌هایی که برروی تیرها نصب خواهند شد به مقایسهٔ چهار تیر معرفی‌شده پرداخته خواهد شد.



شکل ۱ فلوچارت مطالعهٔ حاضر

مواد و مصالح مصرفی

به‌منظور ساخت تیرهای بتن‌آرمه در این مطالعه از انواع میلگردها و خاموت‌های فولادی و GFRP، مصالح پایه (شن، ماسه، سیمان) با طرح اختلاط مشخص استفاده شده‌است که در ادامه هر یک از آن‌ها شرح داده می‌شوند.

میلگردهای پلیمری الیافی

استفاده از مواد مرکب ساخته‌شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به‌عنوان پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف FRP (Fiber Reinforced Polymer) به‌عنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوه‌های موجود معرفی شده‌است.

یکی از کاربردهای FRP استفاده از آن به‌صورت میلگرد است. بسیاری از سازه‌های بتن‌آرمه در محیط‌های خورنده در اثر حملهٔ سولفات‌ها، کلریدها و انواع مواد خورندهٔ دیگر، دچار خرابی‌های مختلفی از قبیل ریزش بتن پوشش و خوردگی آرماتورها می‌شوند. تعمیر این سازه‌ها هزینهٔ بسیار زیادی را در بر خواهد داشت؛ به‌طوری‌که تعمیر و تعویض سازه‌های بتن آرمهٔ خسارت‌دیده در سراسر دنیا هر ساله میلیون‌ها دلار هزینه دارد. شکل (۲) نمونه‌ای از میلگرد FRP را نشان می‌دهد [13].

از آن‌جا که میلگردهای FRP در ایران عموماً از نوع الیاف شیشه است و از الیاف کربن بیشتر برای تولید ورقه‌های CFRP استفاده می‌شود و باتوجه به قیمت پایین‌تر و درنتیجه اقتصادی بودن میلگردهای GFRP که قیمتی تقریباً مشابه میلگردهای فولادی دارند، سعی شد تا از این نوع میلگردها استفاده شود.





شکل ۲ انواع میلگردهای FRP

خاموت‌های مصرفی مطالعهٔ حاضر

در این مطالعه از دو نوع خاموت فولادی و GFRP استفاده شده‌است. خاموت‌های فولادی مورد استفاده در این تحقیق به روش معمول و از قطر ۱۰ میلی‌متر و با فاصلهٔ پشت تا پشت ۱۵×۲۵ سانتی متر ساخته شدند. مسئلهٔ اصلی در ساخت تیرهای مذکور، ساخت خاموت‌های GFRP می‌باشد. از آن‌جا که میلگردهای GFRP قابلیت خم‌شوندگی ندارند برای ساخت خاموت‌ها، ابتدا قالبی ساخته شد که بااستفاده از این قالب در زمان پخت، حرارت‌دهی و ساخت میلگردهای GFRP امکان خم کردن خاموت‌ها به شکل و ابعاد مورد نظر، فراهم می‌شد [12]. نکتهٔ مهم در ساخت خاموت‌های GFRP این بود که از آن‌جا که فرایند ساخت به‌صورت پیوسته بود، خاموت‌های حاصل که دارای مقطع مستطیلی بودند، هم‌چون خاموت‌های ستون‌های دایره‌ای به‌صورت مارپیچ ساخته شدند.

میلگردهای مصرفی مطالعهٔ حاضر

در این تحقیق برای نمونه شاهد از میلگرد فولادی آج‌دار سایز ۱۲ و برای نمونه‌های دوم و سوم از میلگردهای GFRP سایز ۱۲ استفاده شده‌است. طول میلگردهای فولادی ۱۹۰ سانتی‌متر با ۵ سانتی‌متر خم در انتها و طول میلگردهای GFRP نیز ۱۹۰ سانتی‌متر بود. میلگردهای GFRP برخلاف خاموت‌های GFRP نیاز به طراحی و ساخت قالب خاصی نداشتند و به‌صورت آماده خریداری شدند. نکتهٔ بسیار مهم در بحث میلگردهای GFRP عدم داشتن خم انتهایی این میلگردها به‌علت خم نشدن میلگردهای GFRP بود. از آن‌جا که نمونهٔ اول که در آن از میلگردهای فولادی استفاده شده بود دارای خم ۹۰ درجه بودند، باید فکری به حال این مسئله می‌شد تا هر سه تیر مورد مطالعه در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گیرند. بدین منظور از بست‌های کرپی برای ایجاد خم میلگردهای GFRP استفاده شد.

مصالح پایه (شن و ماسه، سیمان و آب)

برای ساخت بتن از شن نخودی و ماسهٔ دو بار شور و سیمان فله‌ای پرتلند تیپ ۲ و آب شرب استفاده شد. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

عملیات اختلاط بتن و بتن‌ریزی

برای ساخت نمونه‌ها از یک کارگاه ساخت تیرچهٔ بتنی در شهرستان شهریار استان تهران استفاده شد. از مزیت‌های این کارگاه داشتن بتونیر ۱۰۰۰ لیتری برای اختلاط مناسب بتن، ترازو برای توزین شن و ماسه و سیمان و آب، دستگاه اسلامپ برای سنجش روانی بتن و قالب های مکعبی برای آزمایش نمونهٔ بتن و فضایی باز برای ساخت راحت و بهتر نمونه‌ها بود. برای اختلاط بتن از طرح اختلاط مطابق با جدول (۲) استفاده شد.

جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

مشخصات شیمیایی	نتایج	حدود استاندارد	مشخصات فیزیکی	نتایج	حدود استاندارد
$\%SiO_2$	20.7±0.3	حداقل: ۲۰	Blaine	3200±100	حداقل: ۲۸۰۰
$\%Al_2O_3$	5.2±0.2	حداکثر: ٦	Auto Clave Method	0.08±0.02	حداکثر: ۰٫۸
$\%Fe_2O_3$	4.6±0.2	حداکثر: ٦	Setting Time In	140±20	حداقل: ٤۵
%CaO	65±0.5	–	Setting Time Fi	240±20	حداکثر: ۳٦۰
%MgO	1.8±0.2	حداکثر: ۵	مقاومت فشاری ۳ روزه	270±20	حداقل: ۱۰۰
$\%SO_3$	2.2±0.4	حداکثر: ۳	مقاومت فشاری ۷ روزه	440±20	حداقل: ۱۷۵
$\%K_2O$	0.5±0.05	–	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	530±20	حداقل: ۳۱۵
$\%Na_2O$	0.15±0.05	–	الک ۰٫۹ میلی متر	1.1±0.1	–
%L.O.I (Loss Of Ignition)	1±0.5	حداکثر: ۳	چگالی	3.12±0.01	-
%I.R (Insoluble Residue)	0.4±0.1	حداکثر: ۰٫۷۵			
%Free CaO	1.3±0.2	–			
$\%C_3S$	59.47	–			
$\%C_2S$	14.48	–			
$\%C_3A$	6	حداکثر: ۸			
$\%C_4AF$	14	–			

جدول ۲ مشخصات وزنی مصالح برای طرح اختلاط بتن

نوع مصالح	مقدار	واحد
آب	۲۲۵	لیتر
سیمان	٤۰۰	کیلوگرم
شن	۸۲۵	کیلوگرم
ماسه	۸۸۰	کیلوگرم

همچنین برای انجام این آزمایش از شن‌های نخودی و ماسهٔ دوبار شور برای ساخت بتن استفاده شد. باتوجه به این‌که برای ساخت نمونه‌ها و قالب‌های مکعبی به کمی کمتر از نیم متر مکعب بتن نیاز بود، عملیات توزین شن و ماسه توسط فرغون برای نصف اوزان جدول فوق صورت پذیرفت. همچنین از ۲۰۰ کیلوگرم سیمان و ۱۱۲/۵ کیلوگرم آب برای ساخت بتن استفاده شد.

دستگاه آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های مطالعهٔ حاضر، از دستگاه بارگذاری چهار نقطه مطابق شکل (۳) استفاده شد. دمای آزمایش برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با دمای محیط آزمایشگاه به‌میزان حدود ۱۹ درجهٔ سانتی‌گراد بود. نرخ بارگذاری اعمال‌شده نیز برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر دقیقه بود. پس از علامت‌گذاری استرین‌گیج‌ها برروی نمونه‌ها، نمونه‌ها توسط جرثقیل برروی ست‌آپ قرار گرفت. به‌دلیل شرایط ست‌آپ موجود در آزمایشگاه، تیر به‌صورت برعکس برروی ست‌آپ قرار می‌گرفت؛ بدین صورت که ناحیهٔ کششی و تکیه‌گاه‌های تیر در بالا و دو بار متمرکز میانی در پایین تیر قرار می‌گرفت. محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها در فاصلهٔ ۱۰ سانتی‌متری از انتهای تیر و در آکس محل قرارگیری پلیت‌ها بود.

پس از انتقال نمونه‌ها برروی ست‌آپ و قرارگیری در محل مناسب مطابق شکل (٤) استرین‌گیج‌ها توسط چسب مخصوص برروی نمونهٔ بتنی نصب می‌شدند. این استرین گیج‌ها توسط رشته سیم‌هایی به دستگاه دیتا لاگر به‌منظور استخراج داده‌ها متصل می‌شدند. همچنین قبل از شروع آزمایش، ضریب مقیاس استرین‌گیج‌ها به کامپیوتر داده می‌شد تا بااستفاده از این ضریب، مقدار عددی کرنش‌ها به‌صورت مستقیم از دیتا لاگر استخراج شود. پس از طی این مراحل دستگاه LVDT که وظیفهٔ آن سنجش خیز تیر به‌صورت مکانیکی در وسط دهانهٔ تیر می‌باشد، برروی تیر نصب می‌شد. پس از طی این مراحل، تیر آمادهٔ آزمایش بود. دمای آزمایش برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با دمای محیط آزمایشگاه به‌میزان حدود ۱۹ درجهٔ سانتی‌گراد بود. نرخ بارگذاری اعمال‌شده نیز برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر دقیقه بود.



شکل ۳ آزمایش چهار نقطه‌ای



شکل ٤ انجام بارگذاری بر روی نمونه‌های ساخته‌شده بااستفاده از دستگاه بارگذاری چهار نقطه‌ای

تحلیل نتایج

پس از انجام تمامی عملیات قبل از آزمایش، نمونهٔ شاهد آمادهٔ بارگذاری شد. نرخ بارگذاری برای هر سه نمونه ثابت و برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر دقیقه به کامپیوتر داده شد. نتایج به‌دست‌آمده از منحنی P-Delta مطابق با شکل (۵) نشان می‌دهد که تیر مذکور تا بارگذاری ۳۰۰ کیلوگرم به‌صورت کاملاً خطی و خیز بسیار ناچیز و پس از آن تا بارگذاری ۱/۵ تن با جابه‌جایی قابل ملاحظه‌ای در حدود چهار میلی‌متر همراه بود که مرحلهٔ دوم به‌صورت غیرخطی رخ داد؛ البته قطعاً تیر تا این محدوده هنوز وارد رفتار غیرخطی نشده بود و این امر که در نمونه‌های دیگر نیز رخ داد به این علت اتفاق می‌افتد که تکیه‌گاه‌های تیر و نقاط اعمال بار متمرکز در شروع بارگذاری به‌صورت صد درصد ثابت و پایدار نیست و کمی پس از بارگذاری وضعیت ثابتی پیدا می‌کند که این امر همراه با جابه‌جایی‌های کوچک در کل تیر اتفاق می‌افتد و خیز مذکور نه در وسط دهانه که در کل تیر نسبت‌به دستگاه LVDT خود را نشان می‌دهد. درواقع می‌توان گفت که رفتار تیر در این محدوده کاملاً خطی می‌باشد.

پس از آن منحنی تیر تا بارگذاری حدود ۱۰/۷ تن به‌صورت کاملاً خطی رفتار کرده و خیز وسط دهانهٔ تیر تا این نقطه به ۱۰ میلی‌متر رسید. نکتهٔ بسیار مهم در بارگذاری نمونهٔ شاهد این است که در حین بارگذاری ترک‌هایی به‌صورت کاملاً منظم و با تعداد زیاد (حدود ۱۵ عدد ترک) در طول تیر رخ داد که این ترک‌ها با افزایش مقدار بار به یک نسبت بزرگ شدند و در عمق تیر گسترش یافتند.

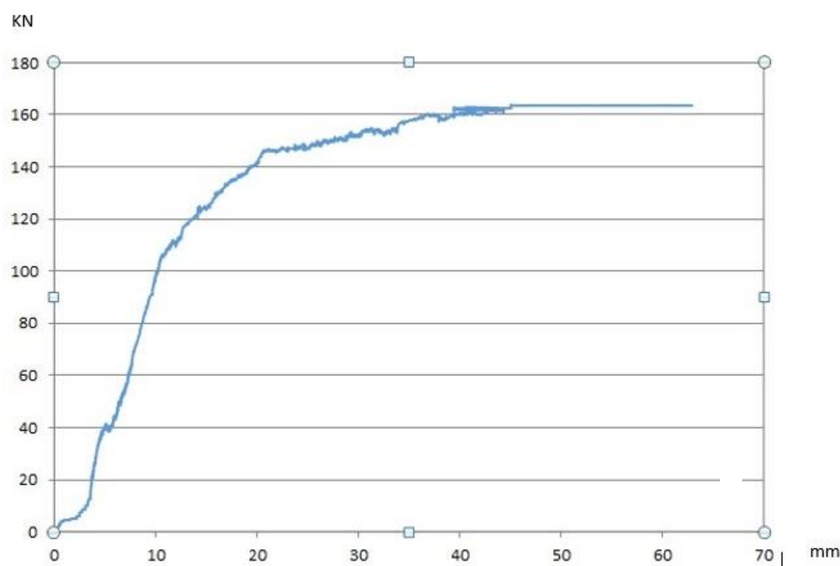
پس از این مرحله تیر وارد رفتار غیرخطی شد و با اعمال بار، خیز تیر افزایش چشم‌گیری پیدا کرد؛ به‌نحوی‌که تا رسیدن بار به عدد ۱٦/۳۵ تن، خیز تیر به عدد ٦۳ میلی‌متر رسید. در طی این مرحله تعداد ترک‌ها ثابت (همان ۱۵ عدد) بود ولی ترک‌ها در حال عریض‌تر شدن بودند که این عریض‌تر شدن با گسترش ترک در عمق تیر یا عمق ناحیهٔ فشاری همراه بود که این امر منجر

به کاهش مقطع مقاومت فشاری بتن و درنتیجه کاهش مقاومت خمشی تیر بتنی شد.

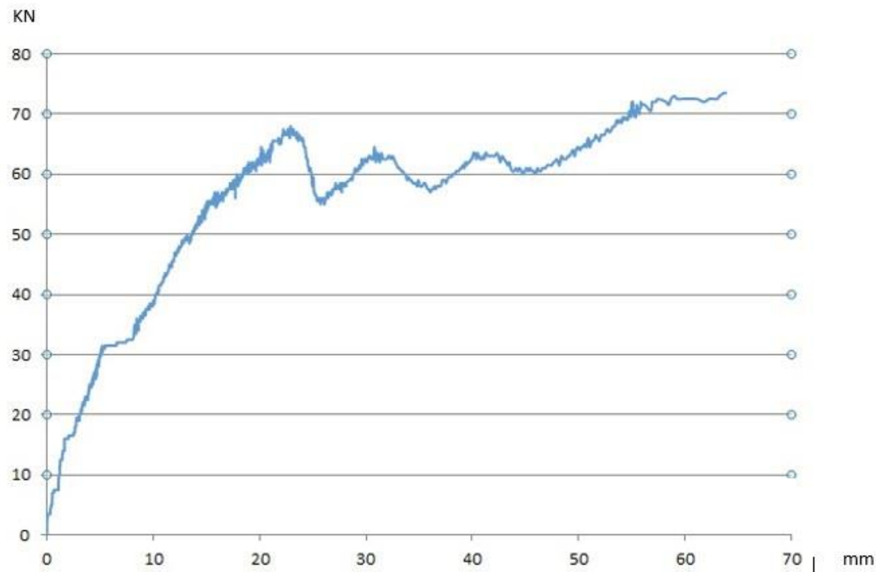
همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد تیر دوم از لحاظ تمامی پارامترهای هندسی و مقاومتی مانند نمونهٔ شاهد بوده، با این تفاوت که در آن به‌جای میلگردهای طولی فولادی، از میلگردهای GFRP استفاده شده‌است. پس از انجام عملیات قبل از آزمایش برای نمونهٔ دوم و قراردادن تیر مذکور برروی ست‌آپ، بارگذاری با نرخ ۷۰۰ کیلوگرم بر دقیقه به تیر اعمال شد. مطابق با شکل (٦) نتایج حاصل از منحنی P-Delta تیر نمونهٔ دوم نشان‌دهندهٔ خطی بودن این نمودار تا بار ۳/۱ تن می‌باشد که این میزان بار، خیز ۵ میلی‌متری را برای تیر به‌دنبال داشت. پس از این مرحله تیر به مقدار کمی وارد ناحیهٔ غیرخطی شده و میزان خیز تیر با ثابت بودن بار، حدود ٤ میلی‌متر افزایش یافته و به ۹ میلی‌متر رسیده و دوباره تیر شروع به مقاومت کرده‌است.

پس از این مرحله منحنی بارگذاری تیر با شیب تقریباً ثابتی از بار ۳/۵ تن تا ٦/۷ تن حرکت کرد و خیز متناظر با این بار حدود ۲۳ میلی‌متر بود. در این لحظه بارپذیری تیر با شنیده شدن صدای مهیب ترک تیر در آزمایشگاه حدود ۱ تن کاهش پیدا کرد و به عدد ۵/۸ تن رسید که خیز تیر نیز تا حدود ۲۵ میلی‌متر افزایش پیدا کرد. پس از آن تیر سه بار حرکت مقاومت خمشی دربرابر افزایش بار و سپس خالی کردن ظرفیت بارپذیری را تکرار کرد که خالی کردن ظرفیت بارپذیری هر بار با شنیده شدن صدای گسترش دو ترک تیر همراه بود. طبق نمودار حاصل از منحنی P-Delta بار اول و بار دوم تیر نتوانست حد اولیهٔ بارپذیری خود را بشکند و در بار اول به عدد ٦/۵ تن در جابه‌جایی ۳۱ میلی‌متر و در بار دوم به عدد ٦/۲ تن در جابه‌جایی ٤۱ میلی‌متر رسید اما در بار سوم منحنی P-Delta به عدد ۷/۳۵ تن در جابه‌جایی ٦٤ میلی‌متر رسید که ماکزیمم بار قابل تحمل توسط تیر مورد نظر بود.

با مقایسهٔ نمونهٔ دوم و نمونهٔ شاهد می‌توان به این نتیجه رسید که در خیز نهایی دو تیر که برای هر دو نمونهٔ شاهد و تیر دوم برابر ٦۳ میلی‌متر می‌باشد قابلیت تحمل بار تیر شاهد حدود دو برابر تیر نمونهٔ دوم می‌باشد. از سوی دیگر نکتهٔ بسیار مهمی که از آن در نتایج این تحقیق استفاده خواهد شد این است که با مشاهدهٔ ترک‌های روی دو تیر می‌توان به این نتیجه رسید که رفتار تیر نمونهٔ دوم متفاوت از رفتار تیر نمونهٔ شاهد است. به بیان دیگر استفاده از آرماتورهای GFRP نه‌تنها ظرفیت بارپذیری تیر را کاهش می‌دهد که حتی نوع رفتار و عملکرد تیر را نیز به‌گونه‌ای دیگر رقم می‌زند.



شکل ۵ منحنی بار تغییر مکان نمونهٔ شاهد در اثر بارگذاری

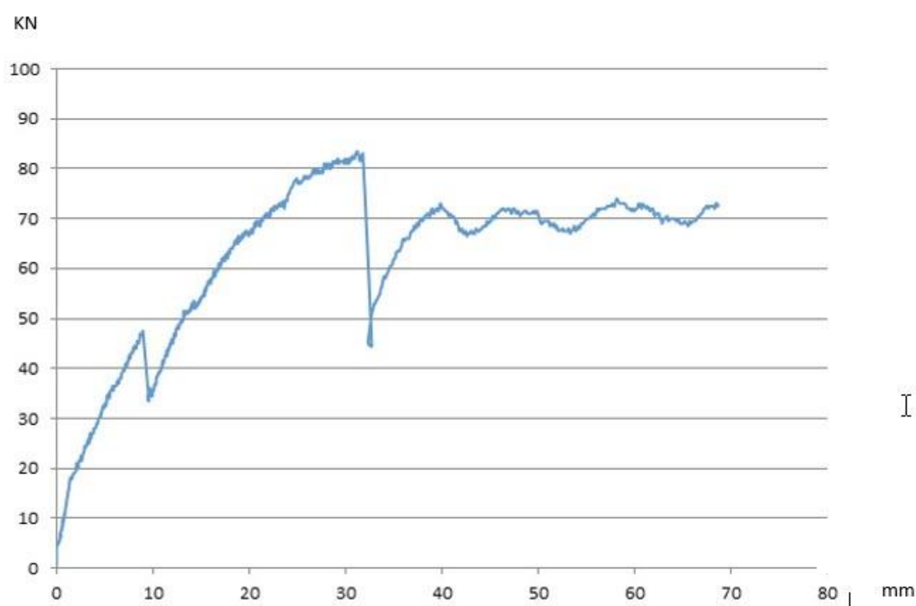


شکل ٦ منحنی بار تغییر مکان نمونهٔ دوم در اثر بارگذاری

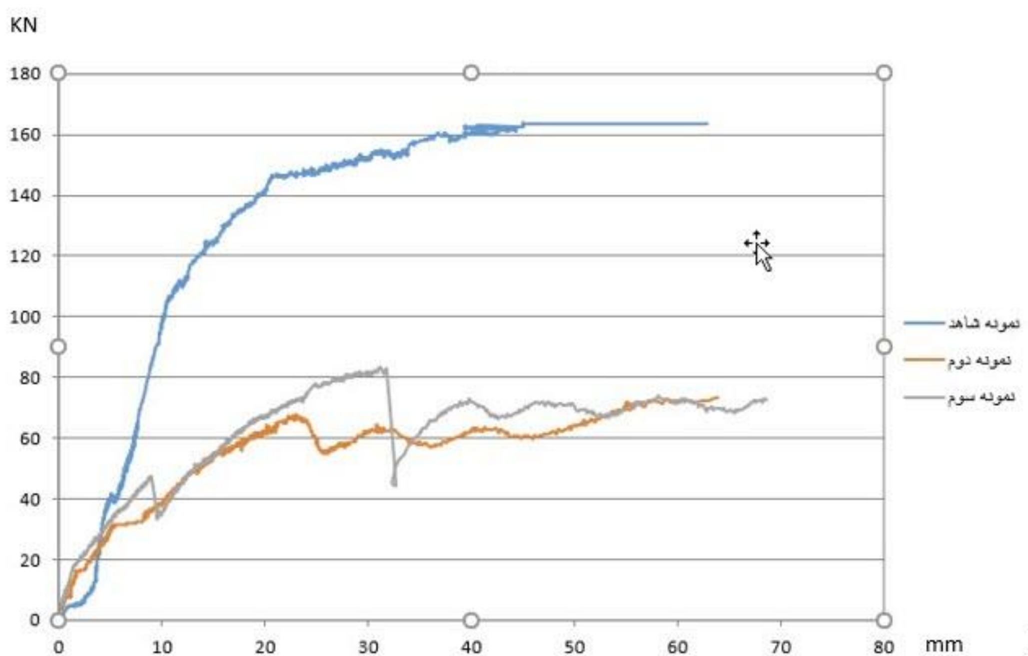
نمونهٔ سوم نیز از لحاظ تمامی پارامترهای هندسی و مقاومتی مانند نمونهٔ شاهد بوده، با این تفاوت که در آن به‌جای میلگردهای طولی فولادی از میلگردهای GFRP و به‌جای خاموت‌های فولادی از خاموت‌های GFRP استفاده شده‌است. پس از انجام عملیات قبل از آزمایش برای نمونهٔ سوم و قراردادن تیر مذکور برروی ست‌آپ، بارگذاری با نرخ ۷۰۰ کیلوگرم بر دقیقه به تیر اعمال شد. مطابق با شکل (۷) نتایج حاصل از منحنی P-Delta تیر نمونهٔ سوم نشان‌دهندهٔ خطی بودن این نمودار تا بار ٤/۷ تن می‌باشد که این میزان بار، خیز ۸/۵ میلی‌متری را برای تیر به‌دنبال داشت. تا این لحظه می‌توان دریافت که محدودهٔ بارگذاری و تغییر مکان خطی نمونهٔ سوم نسبت‌به نمونهٔ دوم افزایش پیدا کرده‌است. پس از این مرحله، شاهد کاهش ظرفیت بارپذیری تیر همراه با شنیده شدن صدای مهیب دو ترک در آن بودیم به‌گونه‌ای که منحنی بار از ٤/۷ تن به حدود ۳/۳ تن رسید و خیز تیر تا حدود ۱۰ میلی‌متر افزایش یافت.

سپس تیر دوباره شروع به مقاومت کرد و این بار تا رسیدن به بار ۸/۳۵ تن در جابه‌جایی ۳۱ میلی‌متری به‌صورت یک‌نواخت و منظم حرکت کرد و پس از آن با وقوع ترک سوم و گسترش دو ترک اول، منحنی بارگذاری به ٤/٤ تن در جابه‌جایی ۳۳ میلی‌متری کاهش پیدا کرد. پس از این مرحله منحنی بار- تغییر مکان دوباره شروع به مقاومت کرد و چهار بار روند افزایش مقاومت و کاهش آن را طی کرد که هر مرحله با گسترش و بزرگ‌تر شدن ترک‌ها اتفاق افتاد و ترک جدیدی در تیر بتنی رخ نداد و مهم‌تر این‌که در هیچ کدام از مراحل جدید رکورد ظرفیت بارپذیری شکسته نشد و در نهایت فرایند بارگذاری در بار ۷/۲۵ تن در خیز ٦۸/٦ میلی‌متر متوقف گردید. از نکات مهم آزمایش نمونهٔ سوم مقدار و گسترش ترک‌ها در تیر بود که همانند نمونهٔ دوم به تعداد خیلی کم رخ داد که این امر نشان‌دهندهٔ رفتار متفاوت تیرهای بتنی ساخته‌شده با میلگردها و خاموت‌های GFRP در مقایسه با تیرهای بتنی ساخته‌شده با میلگردها و خاموت‌های فولادی می‌باشد.

با مشاهده و مقایسهٔ نمودارهای سه نمونهٔ مورد آزمایش مطابق شکل (۸) به‌راحتی می‌توان دریافت که ظرفیت تحمل بار در نمونه‌های دوم و سوم به نصف کاهش پیدا کرده و پرش‌های ناگهانی نمودار در نمونه‌های دوم و سوم نشان‌دهندهٔ افزایش ظرفیت برشی و کاهش شکل‌پذیری این دو نمونه نسبت‌به نمونهٔ شاهد می‌باشد. هر کدام از پرش‌های بزرگ نمودار نشان‌دهندهٔ بروز ناگهانی ترکی بزرگ با عرض زیاد در نمونه‌های دوم و سوم بود که باعث شد تعداد کل ترک‌ها از سه عدد تجاوز نکند، درحالی‌که در نمودار نمونهٔ شاهد، نموداری یک‌نواخت را شاهد هستیم که نشان‌دهندهٔ بروز مرحله‌ای ترک‌ها با تعداد زیاد و عرض کم است.



شکل ۷ منحنی بار تغییر مکان نمونهٔ سوم در اثر بارگذاری



شکل ۸ مقایسهٔ منحنی بار– تغییر مکان نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده (دوم و سوم) در اثر بارگذاری

نتیجه‌گیری

با مطالعه و جمع‌بندی نمودارهای حاصل از آزمایش بار– تغییر مکان سه تیر بتنی می‌توان نکات استخراج شده را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. استفاده از میلگردهای GFRP به‌جای میلگردهای فولادی باعث کاهش ظرفیت خمشی ۵۵ درصدی تیر بتنی می‌شود.

۲. کاهش ظرفیت خمشی تیر بتنی در نتیجهٔ استفاده از میلگردهای GFRP به‌جای میلگردهای فولادی را می‌توان با افزایش قطر

میلگردهای GFRP تا ۵۵ درصد برطرف کرد.

۳. استفاده از خاموت‌های GFRP به‌جای خاموت‌های فولادی باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش شکل‌پذیری تا یک‌سوم در تیرهای بتنی می‌شود.

٤. برای افزایش شکل‌پذیری در تیرهای بتنی که در آن‌ها از خاموت‌های GFRP استفاده شده‌است می‌توان فاصلهٔ خاموت-ها را تا سه‌برابر بیشتر کرد و هم‌زمان از الیاف CFRP در زیر ناحیهٔ کششی تیر و به‌صورت غلاف دور تیر بتنی استفاده کرد.

مراجع

1. Najafi Moghaddam Gilani, V., Hosseinian, S. M., & Nikookar, M., "Presentation of a New Deicer with the Least Moisture and Fatigue Failures in Asphalt Mixtures", *Arabian Journal for Science and Engineering*, VoL. 46, No,11, pp. 10457-10471, (2021).
2. Adeli, S., Salehfard, R., & Amini, B., "The Influence of Asphalt Mixture Components on Pavement Skid Resistance and Accident Rate in Urban Un-Signalized Intersections", *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp. 1-11. (2021).
3. Gilani, V. N. M., Hosseinian, S. M., Hamedi, G. H., & Safari, D., "Presentation of Predictive Models for Two-Objective Optimization of Moisture and Fatigue Damages Caused by Deicers in Asphalt Mixtures", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 49, No. 6, pp. 31-53, (2021).
4. Nikookar, M., Bagheri Movahhed, M., Ayoubinejad, J., Najafi Moghaddam Gilani, V., & Hosseinian, S. M., "Improving the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures by Simultaneous Modification of Asphalt Binder and Aggregates with Carbon Nanofiber and Carbon Nanotube", *Advances in Civil Engineering*, Vol 2021. pp.1-11 (2021).
5. Hamedi, G. H., Esmaeeli, M. R., Najafi Moghaddam Gilani, V., & Hosseinian, S. M., "The Effect of Aggregate-Forming Minerals on Thermodynamic Parameters Using Surface Free Energy Concept and Its Relationship with the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures", Advances in Civil Engineering, Vol 2021, pp.1-15, (2021).
6. Jabbar, S. A., & Farid, S. B., "Replacement of Steel Rebars by GFRP Rebars in the Concrete Structures", *Karbala international journal of modern science*, Vol. 4, No. 2, pp. 216-227, (2018).
7. Sun, Z., Fu, L., Feng, D. C., Vatuloka, A. R., Wei, Y., & Wu, G., "Experimental Study on the Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Bundled Hybrid Steel/FRP Bars", *Engineering Structures*, Vol. 197, pp. 109443, (2019).
8. Hamad, R. J., Haddad, R. H., & Johari, M. M., "New Anchorage System of Bars to Improve the Mechanical Performance of Post-Heated FRP-Reinforced Concrete Beams", *Construction and Building Materials*, Vol. 229, pp. 117090, (2019).
9. Ahmed, H. Q., Jaf, D. K., & Yaseen, S. A., "Flexural Strength and Failure of Geopolymer Concrete Beams Reinforced with Carbon Fibre-Reinforced Polymer Bars", *Construction and Building Materials*, Vol. 231, pp. 117185, (2020).
10. Shen, D., Li, C., Feng, Z., Wen, C., & Ojha, B., "Influence of Strain Rate on Bond Behavior of Concrete Members Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Rebars", *Construction and Building Materials*, Vol. 228, pp. 116755, (2019).
11. Jawad, F., Adarsha, C. Y., Raghavendra, T., Udayashankar, B. C., & Natarajan, K., "Structural Behavior of Concrete

Beams and Columns Reinforced with Waste Plastic Incorporated GFRP (WPGFRP) Rebars", *Journal of Building Engineering*, Vol. 23, No. , pp. 172-184, (2019).

12. Dong, Z., Wu, G., Zhao, X. L., Zhu, H., & Shao, X., "Behaviors of Hybrid Beams Composed of Seawater Sea-Sand Concrete (SWSSC) and a Prefabricated UHPC Shell Reinforced with FRP Bars", *Construction and Building Materials*, Vol. 213, pp. 32-42, (2019).
13. Jumaa, G. B., & Yousif, A. R., "Size Effect on the Shear Failure of High-Strength Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP Bars and Stirrups", *Construction and Building Materials*, Vol. 209, pp. 77-94, (2019).
14. D'Antino, T., & Pisani, M. A., "Long-Term Behavior of GFRP Reinforcing Bars", *Composite Structures*, Vol. 227, pp. 111283, (2019).
15. Sadraie, H., Khaloo, A., & Soltani, H., "Dynamic Performance of Concrete Slabs Reinforced with Steel and GFRP Bars under Impact Loading", *Engineering Structures*, Vol. 191, pp. 62-81, (2019).
16. Zinkaah, O. H., Ashour, A., & Sheehan, T., "Experimental Tests of Two-Span Continuous Concrete Deep Beams Reinforced with GFRP Bars and Strut-and-Tie Method Evaluation", *Composite Structures*, Vol. 216, pp. 112-126, (2019).
17. Saleh, N., Ashour, A., & Sheehan, T., "Bond between Glass Fibre Reinforced Polymer Bars and High-Strength Concrete", In *Structures*, Vol. 22, pp. 139-153, Elsevier, (2019, December).
18. Chen, C. C., & Li, C. Y., "Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Glass Fiber-Reinforced Polymer Laminates", *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 4, pp. 535, (2005).
19. Xue, W., Zheng, Q., Yang, Y., & Fang, Z., "Bond Behavior of Sand-Coated Deformed Glass Fiber Reinforced Polymer Rebars", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 10, pp. 895-910, (2014).
20. Liu, Y., Zhang, H. T., Tafsirojjaman, T., Dogar, A. U. R., AlAjarmeh, O., Yue, Q. R., & Manalo, A., "A Novel Technique to Improve the Compressive Strength and Ductility of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composite Bars", *Construction and Building Materials*, Vol. 326, pp. 126782, (2022).